

Research Paper

Design and Simulation of All Optical Frequency Shift Keying Demodulator by Using Photonic Crystal based Resonant Cavities¹

Akram Asghari-Govar² and Alireza Andalib*³

Received: 2021.03.28

Revised: 2021.05.04

Accepted: 2021.08.12

Abstract

Using all optical devices for implementing all optical communication networks is very important. By using all optical frequency shift keying demodulators one can generate binary codes from the frequency of optical waves. In this paper a novel structure has been proposed for designing photonic crystal based all optical frequency shift keying demodulator. Three resonant cavities with different resonant modes were used for the frequency selecting section. In order to separate three different resonant modes, the radius of the defect rods used inside the cavities was chosen with different size. The simulation results show the proposed structure can generate four binary codes according to the frequency of the input optical waves. Therefore the final structure can work as an all optical frequency shift keying demodulator which can generate 00, 01, 10 and 11 codes at the output ports. The maximum delay time of the proposed structure is 4 ps.

Keywords: *Photonic Crystals, Demodulator, Resonant Cavity, Delay Time.*

¹ DOI: 10.22051/IJAP.2021.35417.1199

² Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, East Azarbaijan, Ahar, Iran. Email: a.asghari@iau-ahar.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, East Azarbaijan, Tabriz, Iran. Email: andalib@iaut.ac.ir

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا

سال یازدهم، پیاپی ۲۵، تابستان ۱۴۰۰

صص ۷۰-۸۲

مقاله پژوهشی

طراحی و شبیه سازی یک دی مدولاتور کلیدزنی انتقال تمام نوری فرکانس با استفاده از کاواک های تشدید مبتنی بر بلور فوتونی^۱

اکرم اصغری گواز^۲ و علیرضا عندلیب*^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۱

چکیده

استفاده از افزاره (ابزار) های تمام نوری برای پیاده سازی شبکه های مخابرات تمام نوری بسیار مهم است. با استفاده از دی مدولاتور (تفکیک کننده) کلیدزنی انتقال تمام نوری فرکانس می توان کدهای دوتایی دیجیتال را با کمک فرکانس نور ورودی تولید کرد. در این مقاله ساختار جدیدی برای طراحی دی مدولاتور کلیدزنی انتقال تمام نوری فرکانس با استفاده از بلورهای فوتونی معرفی شده است. از سه کاواک تشدید با مدهای تشدید (بازآوایی) مختلف برای فرایند گزینش فرکانس ها استفاده شده است. برای این که مدهای تشدید کاواک ها با

^۱ DOI: 10.22051/IJAP.2021.35417.1199

^۲ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، آذربایجان شرقی، ایران. Email: a.asghari@iau-ahar.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران. (نویسنده مسئول). Email: andalib@iaut.ac.ir

یکدیگر متفاوت باشد، شعاع میله های ناراستی به کار رفته درون کاواک های سه گانه، متفاوت از هم انتخاب شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که ساختار پیشنهاد شده می تواند ۴ کد دیجیتال دو تایی بر پایه فرکانس های سیگنال نور ورودی تولید نماید. بنابراین ساختار طراحی شده می تواند به عنوان یک دی مدولاتور انتقال فرکانسی تمام نوری عمل کند و کدهای دو تایی ۰۱، ۱۰ و ۱۱ را در خروجی تولید کند. حداکثر زمان تأخیر ساختار طراحی شده 4 ps است.

واژگان کلیدی: بلور فوتونی، دی مدولاتور، کاواک تشدید، زمان تأخیر.

۱. مقدمه

عمل مدولاسیون (سوار کردن) در مهندسی برق و مخابرات عبارت است از سوار کردن سیگنال پیام (اطلاعات) بر روی سیگنال دیگری که معمولاً فرکانس بالاتری دارد و به آن سیگنال حامل گفته می شود. هدف از مدولاسیون افزایش بُرد سیگنال و بهره وری انتقال و استفاده بهتر از پهنای باند کانال است. همان گونه که می دانیم بُرد (مسافت انتقال) موج وابسته به فرکانس موج است، به این صورت که با افزایش فرکانس، بُرد سیگنال نیز افزایش می یابد. اما مسئله مهم دیگر این است که فرکانس هایی که کاربر آنها انسان است، معمولاً فرکانس کمی دارند. با استفاده از تکنیک مدولاسیون می توان به اصطلاح یک سیگنال کم فرکانس را سوار یک موج با فرکانس بالا کرد و سپس در محیط انتشار انتقال داد. در مدولاسیون، با توجه به تغییرات سیگنال پیام، یکی از خواص سیگنال حامل (مثلاً دامنه، فرکانس، یا فاز) تغییر می کند. به طور کلی فرایند گنجاندن سیگنال حاوی اطلاعات در سیگنالی دیگر را مدولاسیون می نامند.

روش های مدولاسیون در حالت کلی به دو دسته مدولاسیون آنالوگ و مدولاسیون دیجیتال تقسیم می شوند. مهم ترین روش های مدولاسیون آنالوگ، مدولاسیون دامنه، مدولاسیون فاز و مدولاسیون فرکانس است. در این روش ها به ترتیب دامنه، فاز یا فرکانس سیگنال حامل بر اساس تغییرات سیگنال پیام تغییر می کند. مهم ترین روش های مدولاسیون دیجیتال نیز مدولاسیون کلیدزنی انتقال فاز، مدولاسیون کلید زنی انتقال دامنه و مدولاسیون کلید زنی انتقال فرکانس است. در این تکنیک - های مدولاسیون معمولاً کدهای دیجیتال کم فرکانس با استفاده از اعمال تغییرات مناسب در فاز، دامنه یا فرکانس سیگنال حامل با فرکانس بالا ساخته می شود. به طور کلی هدف از مدولاسیون دیجیتال، ارسال یک رشته کد دیجیتال درون یک کانال آنالوگ است.

مدولاسیون کلیدزنی انتقال فرکانس^۴ (FSK) یک فرایند مدولاسیون دیجیتال است که داده‌ها و اطلاعات را با تغییر فرکانس سیگنال، انتقال می‌دهد. در مدولاسیون FSK چهار سطحی، از چهار فرکانس مشخص و متفاوت برای ارسال چهار سطح دیجیتال مختلف مانند ۰، ۰۱، ۱۰ و ۱۱ دیجیتال استفاده می‌شود. در نهایت این سیگنال‌های ارسال شده باید توسط افزاره‌ای (ابزاری) به نام دی‌مدولاتور (تفکیک کننده) مجدداً به شکل دیجیتال ۰ و ۱ تبدیل شوند تا بتوان داده‌های ارسال شده از فرستنده را به طور کامل در گیرنده بازیابی کرد. بدین منظور افزاره‌ای در سمت گیرنده مورد نیاز است که بتواند با توجه به فرکانس نور دریافتی کدهای ۰، ۰۱، ۱۰ و ۱۱ را تولید کند. وظیفه یک دی‌مدولاتور FSK نوری، تولید کدهای دوتایی از فرکانس موج نوری است. این افزاره به طور پی‌درپی از یک شکل موج متغیر با زمان در فواصل زمانی معین نمونه‌برداری کرده و یک عدد دوتایی (دودویی) از نمونه‌های به دست آمده تولید می‌کند. دی‌مدولاتور FSK نوری مجموعه‌ای است که تمامی فرایند تبدیل فرکانس موج به کد دوتایی در آن به شکل نوری انجام می‌شود و سیگنال الکتریکی نقشی در آن ندارد.

بلورهای فوتونی آرایه‌های منظمی از مواد دی‌الکتریک هستند که تغییر ضریب شکست در آنها متناوب است. یک نتیجه مهم متناوب بودن تغییرات ضریب شکست در این ساختارها، باند ممنوعه فوتونی است. باند ممنوعه فوتونی به محدوده فرکانسی (طول موجی) گفته می‌شود که انتشار هرگونه موج‌های نوری در آن محدوده فرکانسی، درون بلور فوتونی ممنوع است. باند ممنوعه فوتونی در بلورهای فوتونی به ضریب شکست دی‌الکتریک و ابعاد ساختار وابسته است [۳-۱].

اولین دی‌مدولاتور تمام‌نوری مبتنی بر بلور فوتونی در سال ۲۰۱۸ توسط کریم‌زاده و عندلیب طراح‌ی و ارائه شده است [۴]. ساختار پیشنهادی پژوهشگران یک دی‌مدولاتور BPSK تمام‌نوری است که می‌تواند کد یکتایی را با در نظر گرفتن فاز سیگنال ورودی در خروجی تولید کند. مکانیزم کار این ساختار مبتنی بر تداخل مخرب و سازنده پرتوهای هم‌فاز و ناهم‌فاز داخل موجبرهای نوری است. یک ساختار دی‌مدولاتور کلیدزنی انتقال فرکانس نیز با ترکیب یک دی‌مالتی پلکسر (جدا کننده چند تایی) تمام نوری و یک کد کننده در بستر بلورهای فوتونی طراح‌ی و ارائه شده است که می‌تواند بر اساس فرکانس نور ورودی ۴ کد دوتایی تولید کند [۵]. مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال تمام‌نوری نیز عملکردی مشابه دی‌مدولاتورهای نوری دارند. اولین مبدل نوری مبتنی بر بلور فوتونی با استفاده از بلورهای فوتونی یک‌بعدی طراح‌ی شده است [۶]. ترکیب اثر غیرخطی کر با فیلترهای نوری روش دیگری برای طراح‌ی مبدل آنالوگ به دیجیتال

⁴ Frequency Shift Keying

نوری است. در این ساختار ابتدا دو فیلتر نوری مبتنی بر بلور فوتونی دوبعدی به صورت سری کنار یکدیگر قرار می گیرند [۷]. مهدیزاده و همکارانش با استفاده از بلورهای فوتونی دوبعدی ساختارهایی دو طبقه متشکل از یک گسسته ساز و یک کد کننده را برای پیاده سازی مبدل های آنالوگ به دیجیتال تمام نوری طراحی و ارائه کرده اند [۸-۱۰]. طاووسی و همکاران نیز برای پیاده سازی مبدل های آنالوگ به دیجیتال تمام نوری از حلقه های تشدید غیر خطی استفاده و دو ساختار جدید را طراحی کرده اند [۱۱]. این ساختارها بر اساس سویچ زنی غیر خطی عمل می کند. از جمله ساختارهای دیگری که می توان با استفاده از بلورهای فوتونی طراحی و پیاده سازی کرد، می توان به گیت های منطقی [۱۴-۱۲]، دیکدر [۱۷-۱۵]، آنکدر [۲۰-۱۸]، جمع کننده [۲۵-۲۱]، تفریق کننده [۲۸-۲۶]، مقایسه کننده [۳۱-۲۹] و مالتی پلکسرهای منطقی تمام نوری [۳۲] نیز اشاره کرد.

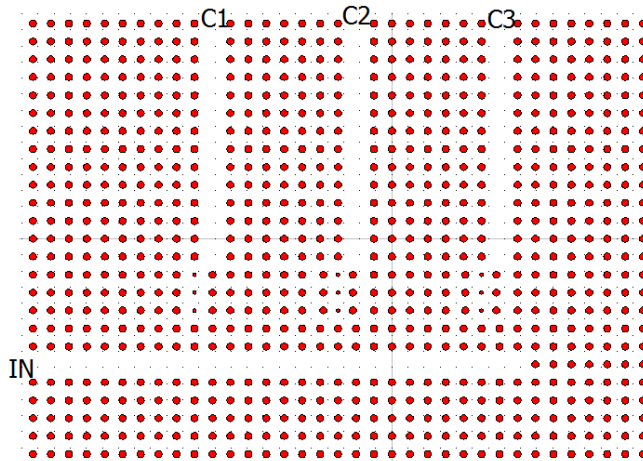
در این مقاله با استفاده از کاواک های تشدید مبتنی بر بلور فوتونی ساختاری برای طراحی و پیاده سازی یک دی مدولاتور کلید زنی انتقال فرکانس ارائه شده است. ساختار پیشنهادی از دو بخش دی مالتی پلکسر (جدا کننده چند تایی) نوری و کد کننده نوری تشکیل شده است. در این ساختار از سه کاواک تشدید با ابعاد فیزیکی متفاوت و باز آوایی در فرکانس های مختلف استفاده شده است. از این ویژگی و قابلیت برای تبدیل فرکانس به گدهای دو تایی استفاده می شود.

۲. دی مالتی پلکسر تمام نوری

برای طراحی یک دی مدولاتور تمام نوری، نیازمند ارائه ساختاری هستیم که بتواند فرکانس های نوری را از یکدیگر جدا کند. این کار توسط یک دی مالتی پلکسر (جدا کننده چند تایی) تمام نوری انجام خواهد شد. یک دی مدولاتور دو تایی دارای ۴ فرکانس است، که جداسازی این چهار فرکانس نیازمند یک دی مالتی پلکسر ۳ کاناله خواهد بود. حال برای طراحی دی مالتی پلکسر اشاره شده مبتنی بر ساختارهای بلور فوتونی، از یک ساختار بلور فوتونی 17×39 با آرایش مربعی به صورت لایه های سیلیکونی در پس زمینه ای از هوا استفاده کردیم. همچنین ساختار مورد نظر دارای ضریب شکست $N=3.46$ ، ثابت شبکه $a=569\text{nm}$ و شعاع میله هایی برابر $r=0.2 \times a$ است. این ساختار دارای دو باند گپ در مد TM و یک باند گپ در مد TE است.

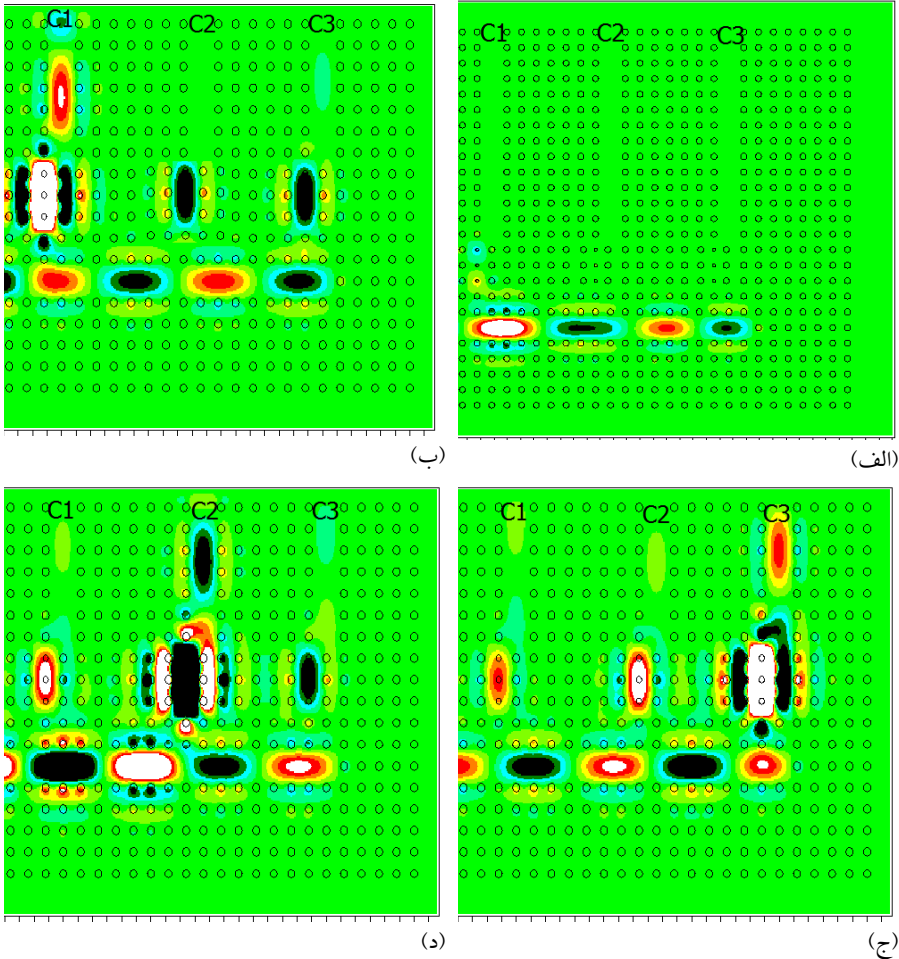
پهنای باند گپ مطلوب در مد TM برابر $0.28 < a/\lambda < 0.42$ بوده که به ازای $a=569\text{nm}$ برابر است با: $1354\text{ nm} < \lambda < 2032\text{ nm}$.

به منظور جداسازی سه فرکانس متفاوت، سه کاواک مختلف با شعاع ناراستی متفاوت در داخل ساختار پایه ایجاد شده‌اند. در کنار کاواک‌ها یک موجبر ورودی و سه موجبر خروجی با حذف تعداد کافی از دی‌الکتریک‌ها در جهت مناسب و داخل ساختار ایجاد شده است. ساختار نهایی دی‌مالتی پلکسر در شکل ۱ نشان داده شده است. با اعمال پالس نوری به ساختار و تعیین طیف طول موج خروجی ساختار، مشاهده می‌شود که ساختار طراحی شده برای دی‌مالتی پلکسر دارای سه مُد تشدید در طول موج های 1530nm، 1540 و 1550nm بوده که به ترتیب معادل فرکانس‌های 196.1THz، 194.8THz و 193.5THz است.



شکل ۱ ساختار نهایی دی‌مالتی پلکسر تمام نوری سه کاناله

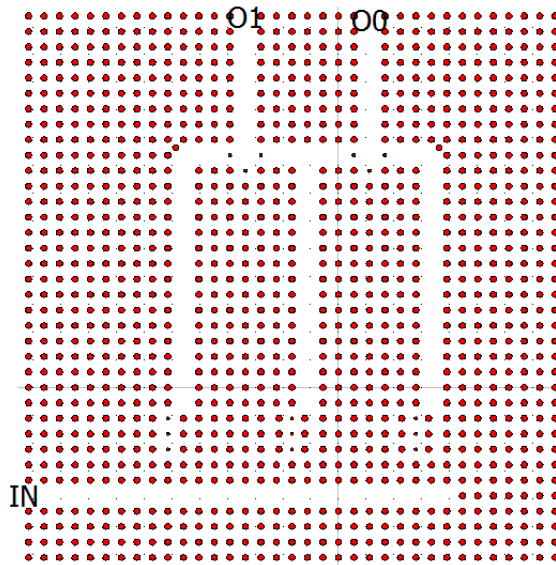
توزیع پرتوهای ورودی برای فرکانس‌های 192 THz، 193.5 THz، 194.8 THz و 196.1 THz در شکل ۲ نشان داده شده است، طبق این شکل برای فرکانس 192 THz هیچ یک از کانال‌های خروجی دی‌مالتی پلکسر فعال نمی‌شود و نور به هیچ یک از خروجی‌ها نمی‌رسد. ولی برای فرکانس‌های 193.5 THz، 194.8 THz و 196.1 THz به ترتیب کانال‌های C2، C1 و C3 فعال شده و نور به خروجی‌های متناظر این کانال‌ها می‌رسد.



شکل ۲ توزیع موج های نوری برای فرکانس های (الف) 192 THz ، (ب) 193.5 THz ، (ج) 194.8 THz و (د) 196.1 THz داخل دی مالتی پلکسر ارائه شده.

۳. طراحی دی مدولاتور تمام نوری

برای طراحی دی مدولاتور مورد نظر، در ساختار دی مالتی پلکسر سه کاناله پیشنهادی تغییراتی صورت گرفته است؛ بدین ترتیب که سه پورت خروجی دی مالتی پلکسر سه کاناله به دو پورت ورودی برای دی مدولاتور تبدیل می شود که شکل ۳ ساختار نهایی آن را نشان می دهد.

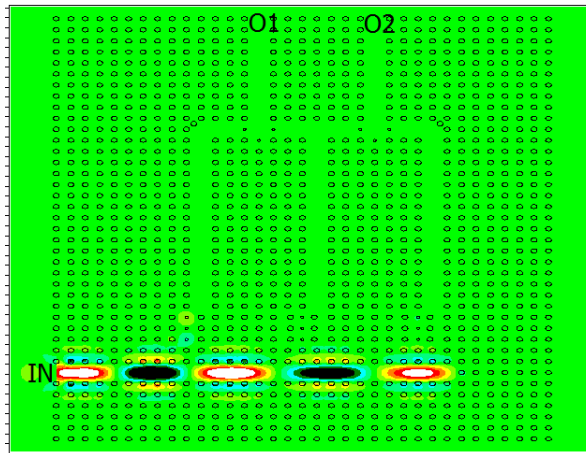


شکل ۳ ساختار دی مدولاتور تمام نوری ارائه شده.

در ادامه به بررسی رفتار نوری ساختار طراحی شده برای دی مدولاتور تمام نوری خواهیم پرداخت.

حالت اول:

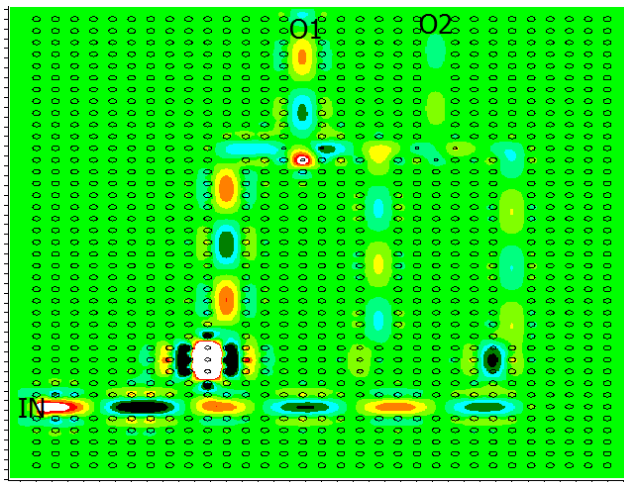
زمانی که فرکانس سیگنال ورودی برابر 192 THz است، هیچ یک از کاواک‌های تشدید نمی‌تواند موج نوری را به داخل موجبر متناسب با خود انتقال دهد. از این رو موج ورودی به هیچ یک از پورت‌های خروجی نخواهد رسید. در نتیجه وقتی که فرکانس ورودی برابر 192 THz است، کد دیجیتال ایجاد شده در خروجی برابر ۰۰ خواهد بود (شکل ۴).



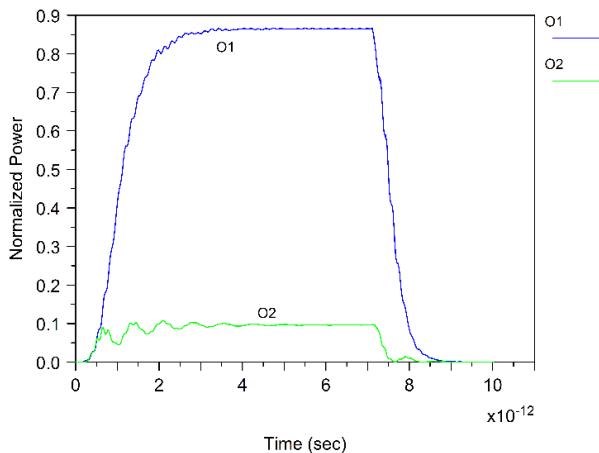
شکل ۴ رفتار نوری ساختار به ازای نور ورودی با فرکانس 192 THz

حالت دوم:

در این حالت نور ورودی دارای فرکانس 193.5 THz است و کاواک تشدید شماره یک (C#1) می‌تواند نور تابیده شده را به موجبر متناسب با خود منتقل کند. در نتیجه این نور می‌تواند به سمت خروجی O0 حرکت نماید، اما هیچ نوری در این حالت به سمت خروجی O1 نخواهد رسید. در نتیجه وقتی که فرکانس ورودی برابر 193.5 THz است، کد دیجیتال ایجاد شده در خروجی برابر ۰۱ خواهد بود. مقدار توان نرمالیزه در خروجی O1 و زمان صعود و نزول به ترتیب برابر ۸۹٪، 2.5 ps و 1 ps خواهد بود (شکل ۵).



(الف)

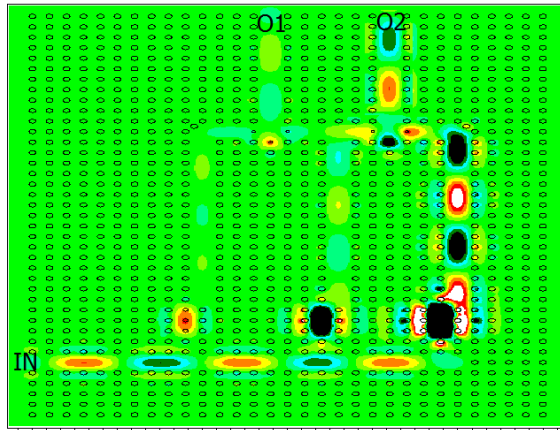


(ب)

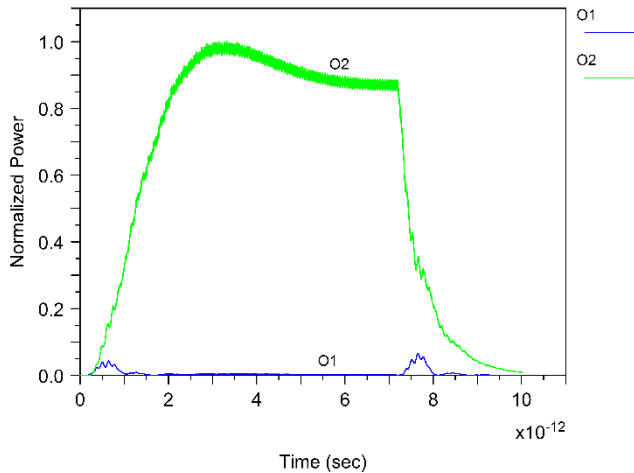
شکل ۵ (الف) رفتار نوری و (ب) پاسخ زمانی ساختار به ازای نور ورودی با فرکانس 193.5 THz

حالت سوم:

در این حالت نور ورودی دارای فرکانس 194.8 THz است و کاواک تشدید شماره دو (C#2) می تواند نور تابیده شده را به موجبر مربوطه ارسال نماید؛ در نتیجه این نور به سمت خروجی O2 حرکت کند. اما هیچ نوری در این حالت به سمت خروجی O0 نخواهد رفت. بنابراین در این فرکانس ورودی کد دیجیتال ایجاد شده در خروجی برابر ۱۰ خواهد بود. مقدار توان نرمالیزه در خروجی O2 و زمان صعود و نزول نیز به ترتیب برابر ۹۰٪، 3 ps و 1 ps خواهد بود (شکل ۶).



(الف)

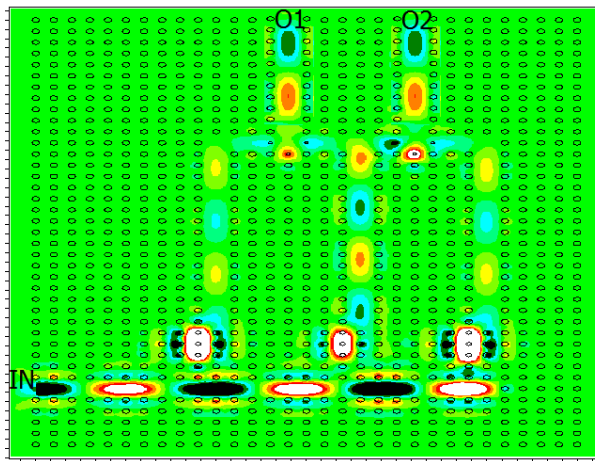


(ب)

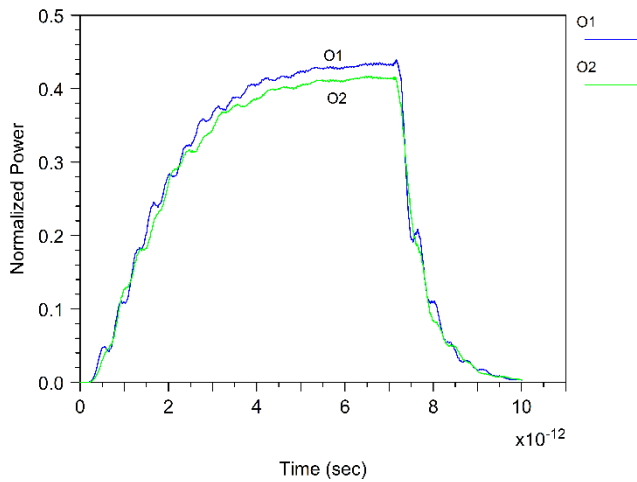
شکل ۶ (الف) رفتار نوری و (ب) پاسخ زمانی ساختار به ازای نور ورودی با فرکانس 194.8 THz

حالت چهارم:

در این حالت نور ورودی دارای فرکانس 196.1 THz است و کاواک تشدید شماره سه (C#3) می‌تواند نور رسیده از ورودی را به موجبر خروجی مطلوب خود انتقال دهد. در نتیجه این موج نوری به سمت پورت‌های خروجی O1 و O2 حرکت خواهد کرد. لذا وقتی که فرکانس ورودی برابر 196.1 THz است، کد دیجیتال ایجاد شده در خروجی برابر ۱۱ می‌شود. مقدار توان نرمالیزه در خروجی O1 و O2 و زمان صعود و نزول به ترتیب برابر ۴۴٪ و ۴۳٪، 4 ps و 1 ps خواهد بود (شکل ۷).



(الف)



(ب)

شکل ۷ (الف) رفتار نوری و (ب) پاسخ زمانی ساختار به ازای نور ورودی با فرکانس 196.1 THz

نتایج ارائه شده در این مقاله با تعدادی از ساختارهایی که عملکردی مشابه دی مدولاتور دارند، در جدول ۱ مقایسه شده است. این مقایسه نشان می دهد که زمان صعود و نزول در ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختارهای پیشین بهتر است.

جدول ۱ مقایسه نتایج ساختار پیشنهادی با ساختارهای مشابه پیشین

کار	ساختار	زمان صعود (ps)	زمان نزول (ps)	تعداد بیت
[۵]	دی مدولاتور FSK	۵	۲	۲
[۱۰]	مبدل آنالوگ به دیجیتال	۵	-	۲
[۸]	مبدل آنالوگ به دیجیتال	۵	-	۲
این کار	دی مدولاتور FSK	۴	۱	۲

۴. نتیجه گیری

با استفاده از کاواک های تشدید مبتنی بر بلور فوتونی یک ساختار دی مدولاتور کلیدزنی انتقال فرکانس تمام نوری طراحی و ارائه شده است. در طراحی این ساختار یک دی مالتی پلکسر پایه برای گسسته سازی فرکانس های مختلف به کار رفته است. مطابق نتایج شبیه سازی، ساختار پیشنهاد شده می تواند چهار گد دیجیتال دوتایی بر پایه فرکانس های سیگنال نور ورودی تولید کند. بنابراین این ساختار می تواند به عنوان یک دی مدولاتور انتقال فرکانس تمام نوری عمل کند. حداکثر زمان تأخیر ساختار مورد نظر 4 ps است.

منابع

- [1]Mehdizadeh F., and Alipour-Banaei H., Bandgap management in two-dimensional photonic crystal thue-morse structures, *J. Opt. Commun.* 34, 61-65 (2013). doi:10.1515/joc-2013-0007.
- [2]Wu Z., Xie K., and Yang H., Band gap properties of two-dimensional photonic crystals with rhombic lattice, *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 123, 534-536 (2012). doi:10.1016/j.ijleo.2011.05.020.
- [3] Noori M., and Soroosh M., A comprehensive comparison of photonic band gap and self-collimation based 2D square array waveguides, *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 126, 4775-4781 (2015). doi:10.1016/j.ijleo.2015.08.082.
- [4] Karimzadeh M., and Andalib A., All Optical BPSK Demodulator Using Photonic Crystal Based Coupled Waveguides, *J. Opt. Commun.* 0, 00. (2018).
- [5] Asghari-Govar A., Andalib A., Zavvari M., and Mohammadi P., A novel proposal for all optical FSK demodulator using photonic crystal based resonant cavities, *Optik (Stuttg)*. 203, 163953 (2020). doi:https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163953.
- [6] Miao B., Chen C., Sharkway A., Shi S., and Prather D.W., Two bit optical analog-to-digital converter based on photonic crystals, *Opt. Express.* 14, 7966 (2006).

- doi:10.1364/OE.14.007966.
- [7] Youssefi B., Moravvej-Farshi M.K., and Granpayeh N., Two bit all-optical analog-to-digital converter based on nonlinear Kerr effect in 2D photonic crystals, *Opt. Commun.* 285,3228–3233 (2012). doi:10.1016/j.optcom.2012.02.081.
- [8] Mehdizadeh F., Soroosh M., Alipour-Banaei H., and Farshidi E., A Novel Proposal for All Optical Analog-to-Digital Converter Based on Photonic Crystal Structures, *IEEE Photonics J.* 9, 1–11 (2017). doi:10.1109/JPHOT.2017.2690362.
- [9] Mehdizadeh F., Soroosh M., Alipour-Banaei H., and Farshidi E., All optical 2-bit analog to digital converter using photonic crystal based cavities, *Opt. Quantum Electron.* 49 (2017) 38. doi:10.1007/s11082-016-0880-8.
- [10] Mehdizadeh F., Soroosh M., Alipour-Banaei H., and Farshidi E., Ultra-fast analog-to-digital converter based on a nonlinear triplexer and an optical coder with a photonic crystal structure, *Appl. Opt.* 56, 1799–1806 (2017). doi:10.1364/AO.56.001799.
- [11] Tavousi A., and Mansouri-Birjandi M.A., Optical-analog-to-digital conversion based on successive-like approximations in octagonal-shape photonic crystal ring resonators, *Superlattices Microstruct.* 114, 23–31 (2018). doi:10.1016/j.spmi.2017.11.021.
- [12] Hassangholizadeh-Kashtiban M., Alipour-Banaei H., Tavakoli M.B., and Sabbaghi-Nadooshan R., Creation of a fast optical Toffoli gate based on photonic crystal nonlinear ring resonators, *J. Comput. Electron.* 19, 1281–1287 (2020). doi:10.1007/s10825-020-01508-3.
- [13] Hassangholizadeh-Kashtiban M., Alipour-Banaei H., Tavakoli M.B., and Sabbaghi-Nadooshan R., All-optical Fredkin gate using photonic-crystal-based nonlinear cavities, *Appl. Opt.* 59, 635–641 (2020). doi:10.1364/AO.379613.
- [14] Hassangholizadeh-Kashtiban M., Alipour-Banaei H., Tavakoli M.B., and Sabbaghi-Nadooshan R., An ultra fast optical reversible gate based on electromagnetic scattering in nonlinear photonic crystal resonant cavities, *Opt. Mater. (Amst)*. 94, 371–377 (2019). doi:https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.06.014.
- [15] Alipour-Banaei H., Rabati M.G., Abdollahzadeh-Badelbou P., and Mehdizadeh F., Effect of self-collimated beams on the operation of photonic crystal decoders, *J. Electromagn. Waves Appl.* 30, 1440–1448 (2016). doi:10.1080/09205071.2016.1202785.
- [16] Mehdizadeh F., Alipour-Banaei H., and Serajmohammadi S., Design and simulation of all optical decoder based on nonlinear PhCRRs, *Opt.-Int. J. Light Electron Opt.* 156, 701–706 (2018). doi:https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.12.011.
- [17] Khosravi S., and Zavvari M., Design and analysis of integrated all-optical 2×4 decoder based on 2D photonic crystals, *Photonic Netw. Commun.* 35, 122–128 (2018). doi:10.1007/s11107-017-0724-x.
- [18] Alipour-Banaei H., Rabati M.G., Abdollahzadeh-Badelbou P., and Mehdizadeh F., Application of self-collimated beams to realization of all optical photonic crystal encoder, *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures.* 75, 77–85 (2016). doi:10.1016/j.physe.2015.08.011.
- [19] Gholamnejad S., and Zavvari M., Design and analysis of all-optical 4--2 binary encoder based on photonic crystal, *Opt. Quantum Electron.* 49, 302 (2017). doi:10.1007/s11082-017-1144-y.
- [20] Moniem T.A., All-optical digital 4×2 encoder based on 2D photonic crystal ring resonators, *J. Mod. Opt.* 63, 735–741 (2016). doi:10.1080/09500340.2015.1094580.
- [21] Rahmani A., and Mehdizadeh F., Application of nonlinear PhCRRs in realizing all optical half-adder, *Opt. Quantum Electron.* 50, 30 (2017). doi:10.1007/s11082-017-1301-3.
- [22] Serajmohammadi S., Alipour-Banaei H., and Mehdizadeh F., Proposal for realizing an all-optical half adder based on photonic crystals, *Appl. Opt.* 57, 1617 (2018). doi:10.1364/ao.57.001617.
- [23] Jalali P., and Andalib A., Application of nonlinear PhC-based resonant cavities for

- realizing all optical Galois Filed adder, *Optik(Stuttg)*.180,498-504(2019). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.11.125>.
- [24] Vali-Nasab A.-M., Mir A., and Talebzadeh R., Design and simulation of an all optical full-adder based on photonic crystals, *Opt. Quantum Electron.* 51, 161 (2019).doi:10.1007/s11082-019-1881-1.
- [25] Jalali-Azizpoo M.R., Soroosh R, M, and Seifi-Kavian Y., Application of self-collimated beams in realizing all-optical photonic crystal-based half-adder, *Photonic Netw. Commun.*36, 344-349 (2018). doi:10.1007/s11107-018-0786-4.
- [26] Askarian A., Akbarizadeh G., and Fartash M., A novel proposal for all optical half-subtractor based on photonic crystals, *Opt. Quantum Electron.* 51, 264 (2019). doi:10.1007/s11082-019-1978-6.
- [27] Askarian A., Akbarizadeh G., and Fartash M., All-optical half-subtractor based on photonic crystals, *Appl. Opt.* 58, 5931 (2019). doi:10.1364/AO.58.005931.
- [28] Moradi R., All optical half subtractor using photonic crystal based nonlinear ring resonators, *Opt. Quantum Electron.* 51, 1-9 (2019). doi:10.1007/s11082-019-1831-y.
- [29] Serajmohammadi S., Alipour-Banaei H., and Mehdizadeh F., A novel proposal for all optical 1-bit comparator using nonlinear PhCRRs, *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.* 34, 19-23 (2019). doi:10.1016/j.photonics.2019.01.002.
- [30] Zhu L., Mehdizadeh F., and Talebzadeh R., Application of photonic-crystal-based nonlinear ring resonators for realizing an all-optical comparator, *Appl. Opt.* 58, 8316-8321. (2019) doi:10.1364/AO.58.008316.
- [31] Surendar A., Asghari M., and Mehdizadeh F., A novel proposal for all-optical 1-bit comparator using nonlinear PhCRRs, *Photonic Netw. Commun.* 38, 244-249 (2019). doi:10.1007/s11107-019-00853-z.
- [32] Zhao T., Asghari M., and Mehdizadeh F., An All-Optical Digital 2-to-1 Multiplexer Using Photonic Crystal-Based Nonlinear Ring Resonators, *J. Electron. Mater.* 48, 2482-2486 (2019). doi:10.1007/s11664-019-06947-8.